

Dự đoán lực ứng suất trước trong dầm bê tông cốt thép ứng suất trước sử dụng tần số dao động và mô hình học máy

Trần Mạnh Hùng^{1,2}, Trần Quốc Tiến^{1,2}, Nguyễn Trần Minh Quân^{1,2}, Bùi Ngọc Tuấn Hùng^{1,2}, Lê Hoàng Khánh^{1,2}, Chiêm Hồng Huân^{1,2}, Nguyễn Chí Khải^{1,2}, Vũ Khánh Hoàng^{1,2}, Hà Minh Tuấn³, Hồ Đức Duy^{1,2,*}

¹Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa TP. Hồ Chí Minh, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

²Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, TP. Thủ Đức, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

³Viện Công nghệ Việt - Nhật, Trường Đại học Công nghệ TP.HCM, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Liên hệ

Hồ Đức Duy, Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa TP. Hồ Chí Minh, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, TP. Thủ Đức, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Email: hoducduy@hcmut.edu.vn

Lịch sử

- Ngày nhận: 05-6-2024
- Ngày sửa đổi: 08-8-2024
- Ngày chấp nhận: 18-11-2024
- Ngày đăng: 31-12-2024

DOI:

<https://doi.org/10.32508/stdjet.v7i4.1380>



Bản quyền

© ĐHQG TP.HCM. Đây là bài báo công bố mở được phát hành theo các điều khoản của the Creative Commons Attribution 4.0 International license.



TÓM TẮT

Cơ sở hạ tầng ngành xây dựng đóng vai trò quan trọng trong cuộc sống và sự phát triển của đất nước. Tuy nhiên, công trình xây dựng dưới tác động của nhiều yếu tố khác nhau trong quá trình vận hành bị xuống cấp sau thời gian dài sử dụng. Để bảo đảm sự vận hành an toàn cho các công trình xây dựng, lĩnh vực theo dõi và chẩn đoán sức khỏe công trình (Structural Health Monitoring: SHM) đã ra đời và phát triển. Trong những năm gần đây, sự bùng nổ của trí tuệ nhân tạo đã và đang đóng góp vào mọi mặt của đời sống xã hội; trong đó có lĩnh vực SHM. Trong lĩnh vực xây dựng, kết cấu bê tông cốt thép ứng suất trước (BTCT UST) đã và đang được áp dụng rộng rãi cho các công trình xây dựng (cầu, nhà cao tầng, ...). Các hư hỏng thường gặp trên kết cấu BTCT UST đều dẫn đến tổn hao lực ứng suất trước trong kết cấu. Bài báo này đề xuất một phương pháp dự đoán lực ứng suất trước trong dầm BTCT UST dựa trên tần số dao động và thuật toán học máy. Trước tiên, tần số dao động của một dầm BTCT UST được phân tích cho các cấp lực ứng suất trước khác nhau theo phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH). Độ tin cậy của mô hình PTHH được kiểm chứng thông qua so sánh với giá trị tần số dao động thực nghiệm. Tiếp đến, thuật toán học máy hồi quy đa thức được xây dựng để xác định lực ứng suất trước trong dầm từ tần số dao động. Phương pháp đề xuất trong bài báo này có độ chính xác cao khi sử dụng để dự đoán lực ứng suất trước cho dầm. Hơn nữa, nghiên cứu này cũng thực hiện khảo sát và đánh giá hiệu quả khi sử dụng kết hợp tần số dao động của nhiều dạng dao động khác nhau.

Từ khóa: lực ứng suất trước, dầm bê tông cốt thép ứng suất trước, tần số dao động, học máy, thuật toán hồi quy đa thức

GIỚI THIỆU

Theo dõi và chẩn đoán sức khỏe kết cấu công trình (Structural health monitoring: SHM) có vai trò quan trọng trong lĩnh vực kỹ thuật xây dựng. SHM cung cấp các giải pháp nhằm phát hiện sớm các hư hỏng, xuống cấp và những bất thường của công trình trong quá trình khai thác và sử dụng. Qua đó, sự an toàn của công trình và con người được bảo đảm trong quá trình khai thác, tối ưu được quá trình bảo trì, cũng như và kéo dài tuổi thọ cho công trình¹. Trong ngành xây dựng, kết cấu bê tông cốt thép ứng suất trước (BTCT UST) đã và đang được áp dụng rộng rãi cho các công trình như cầu, nhà cao tầng, ... Trong đó, dầm BTCT UST là một trong những cấu kiện chịu lực chính, được sử dụng rất rộng rãi. Khả năng làm việc của dầm BTCT UST phụ thuộc chủ yếu vào lực ứng suất trước (UST) trong dầm. Do vậy, tình trạng lực UST trong dầm là một yếu tố quan trọng cần được giám sát và theo dõi cẩn thận để phát hiện kịp thời các yếu tố bất thường. Qua đó, các bất thường xuất hiện trên kết cấu dầm BTCT UST được phát hiện và xử lý kịp thời; bảo đảm công trình vận hành an toàn, tin cậy, hạn chế tối

thiểu các sự cố và thiệt hại có thể xảy ra.

Các phương pháp SHM cho kết cấu dầm BTCT UST đã được một số tác giả thực hiện nghiên cứu và thu được các kết quả quan trọng. Năm 2004, Kim và cộng sự đã giới thiệu một phương pháp xác định lực UST trong dầm BTCT UST có cáp thẳng dựa trên tần số dao động². goài ra, tác giả cũng đã đề xuất một phương pháp dự đoán lực UST cho dầm sử dụng giải thuật nghịch đảo phương pháp này xác định lực UST dựa trên sự biến đổi của tần số dao động so với các trạng thái tham chiếu (khi không có lực UST và khi lực UST lớn nhất). Kết quả dự đoán từ phương pháp này có độ sai lệch từ 1% đến 75%. Năm 2010, Kim và cộng sự đã đề xuất một quy trình chẩn đoán gồm ba bước (cảnh báo hư hỏng tổng thể, thực hiện phân loại hư hỏng và xác định mức độ của hư hỏng) cho dầm BTCT UST sử dụng đồng thời phương pháp dao động và phương pháp trở kháng³. Mức độ mất mát lực UST được chẩn đoán khá chính xác (sai lệch trung bình 0% đến 14%). Tuy nhiên, kết quả dự đoán mức độ hư hỏng do gia tăng khối lượng có độ chính xác thấp (sai lệch từ 48.2% đến 53.7%). Năm 2012, Hồ và cộng sự

Trích dẫn bài báo này: Hùng T M, Tiến T Q, Quân N T M, Hùng B N T, Khánh L H, Huân C H, Khải N C, Hoàng V K, Tuấn H M, Duy H D. **Dự đoán lực ứng suất trước trong dầm bê tông cốt thép ứng suất trước sử dụng tần số dao động và mô hình học máy.** *Sci. Tech. Dev. J. - Eng. Tech.* 2024; 7(4):2392-2401.

đã phát triển một quy trình thiết lập lực UST trong dầm BTCT UST có cấp dạng cong dựa trên tần số dao động và phương pháp nhận dạng kết cấu⁴. Phương pháp này cho kết quả xác định lực UST có mức độ sai lệch từ 0.1% đến 54.6%. Năm 2019, Jaber và Glisic đã thực hiện bài đánh giá tổng quan về các phương pháp xác định lực UST được đề xuất⁵. Bài đánh giá này chỉ ra năm nhóm phương pháp chính được dùng chẩn đoán lực UST, gồm có nhóm phương pháp sử dụng các đặc trưng dao động, nhóm phương pháp sử dụng trở kháng, nhóm phương pháp sử dụng sóng âm, nhóm phương pháp sử dụng từ tính và nhóm phương pháp sử dụng biến dạng. Tuy nhiên, chỉ có nhóm phương pháp sử dụng biến dạng đang được ứng dụng rộng rãi trên công trình thực tế một số phương pháp khác đang được tiếp tục nghiên cứu và hứa hẹn sẽ bổ sung và khắc phục những thiếu sót cho phương pháp sử dụng biến dạng.

Như vậy, việc dự đoán chính xác và theo dõi giá trị lực UST là hết sức cần thiết để bảo đảm sự an toàn trong quá trình sử dụng cho kết cấu dầm BTCT UST. Trước nhu cầu cấp thiết đó, nghiên cứu này được tiến hành nhằm đề xuất phương pháp không phá hủy (Non-Destructive Testing) để dự đoán lực UST trong dầm BTCT UST dựa trên tần số dao động kết hợp thuật toán học máy hồi quy đa thức. Phương pháp này đưa ra dự đoán lực UST căn cứ vào sự biến đổi tần số dao động của dầm BTCT UST. Mô hình PTHH của một dầm BTCT UST được xây dựng bằng phần mềm ANSYS và độ tin cậy được kiểm chứng với thực nghiệm. Tần số dao động của dầm được phân tích ứng với các cấp lực UST khác nhau. Từ đó, một mô hình học máy hồi quy đa thức được thiết lập và sử dụng để dự đoán lực UST trong dầm. Dữ liệu đầu vào của mô hình học máy là các giá trị tần số dao động tương ứng với các trạng thái của dầm. Thêm vào đó, nghiên cứu này cũng xem xét và đánh giá tính hiệu quả khi sử dụng kết hợp dữ liệu tần số dao động trong việc dự đoán lực UST.

PHƯƠNG PHÁP DỰ ĐOÁN LỰC ỨNG SUẤT TRƯỚC DỰA TRÊN TẦN SỐ DAO ĐỘNG VÀ MÔ HÌNH HỌC MÁY

Phương pháp xác định tần số dao động của dầm BTCT UST

Năm 2004, Kim và cộng sự đã kiến nghị một cách xác định tần số dao động cho dầm BTCT UST². Trong đó, độ cứng chống uốn tương đương của dầm BTCT được tính toán theo các công thức như sau:

$$E_r I_r = E_c I_c + \left(\frac{L_r}{n\pi} \right)^2 N \quad (1)$$

$$L_r = L \left(1 - \frac{N}{A_c E_c} \right) \quad (2)$$

trong đó, $E_r I_r$ là độ cứng chống uốn tương đương của tiết diện dầm BTCT UST; E_c là mô đun đàn hồi của bê tông; I_c là mô men quán tính của tiết diện dầm bê tông; L_r là chiều dài nhịp dầm sau khi căng cáp; A_c là diện tích của tiết diện dầm bê tông; N là lực UST.

Tần số dao động của dầm BTCT UST được xác định theo độ cứng tương đương theo công thức như sau:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{n\pi}{L_r} \right) \sqrt{\frac{1}{m_r} \left(E_c I_c + \left(\frac{L_r}{n\pi} \right)^2 N \right)} \quad (3)$$

với n là dạng dao động thứ n ($n=1,2,\dots,n$); m_r là khối lượng trên đơn vị chiều dài của dầm.

Mô hình học máy sử dụng thuật toán hồi quy đa thức

Học máy (Machine Learning: ML) là một lĩnh vực nghiên cứu của trí tuệ nhân tạo (Artificial Intelligence: AI). Lĩnh vực này tập trung vào việc phát triển các mô hình và thuật toán có khả năng học tập từ dữ liệu để đưa ra các dự đoán, hành động hoặc quyết định thông qua một mô hình xấp xỉ mối quan hệ tương quan giữa các dữ liệu mà không cần lập trình cho từng tác vụ cụ thể. Kỹ thuật học máy được chia thành ba nhóm chính gồm: học không giám sát (Unsupervised Learning), học có giám sát (Supervised Learning) và học tăng cường (Reinforcement Learning). Một mô hình học máy được mô tả qua các tham số của mô hình; việc xây dựng một thuật toán học máy tương ứng với đi tìm các tham số sao cho phương pháp đánh giá đạt được kết quả tốt nhất. Với các bài toán hồi quy, mô hình được xem là tốt khi sai lệch giữa giá trị thực tế và giá trị dự đoán là nhỏ nhất. Mối quan hệ giữa phép đánh giá đối với các tham số θ được thể hiện qua hàm mất mát $L(\theta)$. Để phép đánh giá đạt kết quả tốt thì cần phải cực tiểu hóa hàm mất mát, $\underset{\theta}{\operatorname{argmin}} L(\theta)$

là giá trị θ^* để $L(\theta)$ đạt giá trị nhỏ nhất:

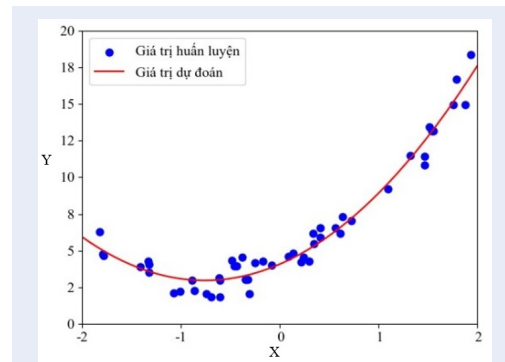
$$\theta^* = \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} L(\theta) \quad (4)$$

Một số thuật toán ML đã được phát triển như sau: thuật toán hồi quy tuyến tính, thuật toán hồi quy đa thức, thuật toán hồi quy đa thức phân đoạn, thuật toán học sâu, ... Nghiên cứu này sử dụng thuật toán hồi quy đa thức vì tính đơn giản nhưng vẫn bảo đảm độ chính xác. Thuật toán hồi quy đa thức thuộc nhóm thuật toán học có giám sát, thường được dùng để xây dựng mô hình xấp xỉ cho các tập dữ liệu có quan hệ phi tuyến. Mô hình được thiết lập bằng cách xác định

vector đặc trưng mới dựa trên vector đặc trưng ban đầu. Giá trị của hàm mất mát là tổng sai số giữa giá trị thực của tất cả các điểm dữ liệu được sử dụng làm kinh nghiệm thiết lập mô hình khi so với giá trị dự đoán (Hình 1). Hàm mất mát được xác định như sau:

$$L(w) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i^T w)^2 \quad (5)$$

trong đó, $L(w)$ là hàm mất mát; N là số điểm dữ liệu dùng để thiết lập mô hình; x_i là vector thông số đầu vào của điểm dữ liệu thứ i ; y_i là thông số đầu ra của điểm dữ liệu thứ i ; w là vector trọng số.



Hình 1: Minh họa thuật toán hồi quy đa thức

Đánh giá hiệu suất dự đoán của mô hình

Hiệu suất dự đoán của mô hình hồi quy được đánh giá thông qua chỉ số⁶:

+ Mean Square Error (MSE) là phương sai của các sai số cho từng mẫu đánh giá. Hiệu suất dự đoán của mô hình được xem là tốt khi giá trị MSE thấp.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y_i - \hat{y}_i]^2 \quad (8)$$

trong đó: n là số điểm dữ liệu; y_i là giá trị thực tế; $\hat{y}_i$ là giá trị dự đoán.

+ Root Mean Square Error (RMSE) là độ lệch chuẩn của các sai số cho từng mẫu đánh giá, RMSE có cùng đơn vị đo với nhân dữ liệu; do đó, RMSE cho cảm nhận tốt hơn MSE về độ lớn nhỏ của kết quả so với nhân dữ liệu; tương tự với độ đo MSE, giá trị RMSE nhỏ cho thấy mô hình có hiệu suất dự đoán tốt.

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (9)$$

Phương pháp kiểm thử Leave-One-Out Cross-Validation (LOOCV)

Khi tập dữ liệu sử dụng để thiết lập mô hình có số lượng hạn chế, việc đánh giá chéo (Cross-validation)

sẽ giúp giải quyết các vấn đề về phân chia dữ liệu cho quá trình đào tạo và kiểm thử. Với phương pháp này, mô hình được huấn luyện số lượng dữ liệu đào tạo lớn (Training set) và đánh giá với số lượng mẫu kiểm thử nhỏ nhưng thực hiện trên nhiều tập kiểm thử khác nhau (Validation set); từ đó bảo đảm đủ số lượng dữ liệu sử dụng cho quá trình đào tạo và hiện tượng quá khớp (Overfitting) do thiếu dữ liệu kiểm thử được hạn chế⁷.

Trong phương pháp LOOCV, tập dữ liệu ban đầu (tập CV) được chia thành k tập con có kích thước như nhau được gọi là các “Fold”. Số tập con này bằng đúng số lượng phần tử trong tập dữ liệu ban đầu. Tại mỗi lần lặp, một trong số các tập con sẽ được sử dụng làm tập kiểm thử và mô hình học máy sẽ được thiết lập với $k-1$ tập con còn lại. Trình tự này được lặp lại cho đến khi tất cả các tập con đều được sử dụng để kiểm thử. Kết quả đánh giá mô hình được tính bằng giá trị trung bình của kết quả đánh giá tất cả các lần lặp. Cuối cùng, tất cả dữ liệu của tập CV sẽ được sử dụng để xây dựng một mô hình hoàn chỉnh (mô hình này sẽ dùng cho việc dự đoán kết quả). Minh họa cho phương pháp LOOCV cho tập dữ liệu có k phần tử được trình bày tại Bảng 1.

KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Mô phỏng số dầm bê tông cốt thép ứng suất trước

Nghiên cứu này mô phỏng một dầm BTCT UST có tiết diện chữ T, chiều dài nhịp 6 m, chiều cao tiết diện 600 mm, chiều rộng cánh trên 710 mm, chiều rộng bụng dầm 90 mm, vùng bố trí cáp UST có kích thước 140×180 mm. Bê tông làm dầm có cường độ chịu nén 23,6 MPa, mô đun đàn hồi 20.000 MPa; cáp UST trong dầm sử dụng một tao cáp thẳng loại 7 sợi, đường kính danh nghĩa 15,2 mm, cấp bền Grade 250, đặt cách mặt dưới dầm 70 mm; cốt thép (dọc và đai) của dầm sử dụng thép Grade 60 đường kính 10 mm^{3,4}. Chi tiết cụ thể về các thông số hình học và vật liệu của dầm được thể hiện tại Bảng 2 và Hình 2.

Kết cấu dầm BTCT UST được mô hình hóa bằng phần mềm ANSYS. Mô hình sử dụng hai loại phần tử chính là SOLID65 và LINK180. Phần tử khối SOLID65 được dùng để mô phỏng bê tông; phần tử LINK180 được dùng để mô phỏng cốt thép và cáp UST. Các phần tử của mô hình được liên kết tại các nút nhằm đảm bảo sự làm việc đồng thời giữa bê tông, cốt thép và cáp dự ứng lực. Mô hình PTHH có lưới phần tử được chia với kích thước lớn nhất là 50 mm; số lượng phần tử SOLID65 và LINK180 lần lượt là 15.616 và 2.788 phần tử. Mô hình PTHH của dầm BTCT UST được thể hiện tại Hình 3. Lực UST trong dầm được

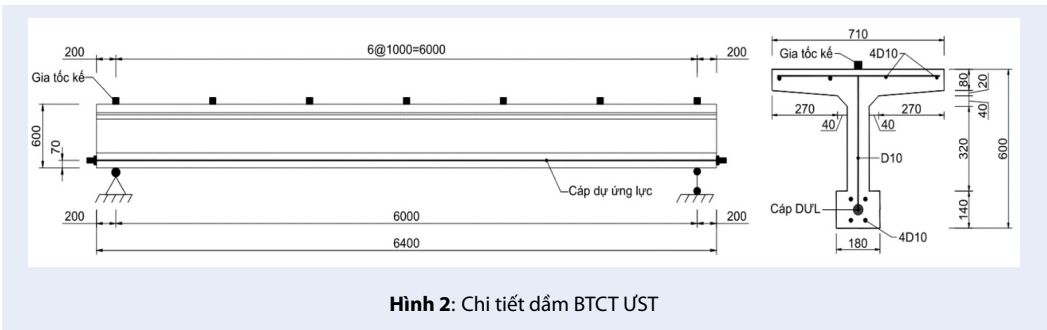
Bảng 1: Minh họa phương pháp LOOCV

Lần lặp	Fold 1	Fold 2	Fold i	Fold k-1	Fold k	Hiệu suất
1	KT	HL	HL	HL	HL	P1
2	HL	KT	HL	HL	HL	P2
i	HL	HL	KT	HL	HL	Pi
k-1	HL	HL	HL	KT	HL	Pk-1
k	HL	HL	HL	HL	KT	Pk
Mô hình hoàn chỉnh	HL	HL	HL	HL	HL	$\sum P_i/k$

Ghi chú: KT: kiểm thử, HL: huấn luyện.

Bảng 2: Đặc trưng vật liệu dầm BTCT UST

Đặc trưng vật liệu	Đơn vị	Bê tông	Cốt thép	Cáp ứng suất trước
Mô đun đàn hồi	MPa	20.000	200.000	195.000
Khối lượng riêng	kg/m ³	2.400	7.850	7.850
Hệ số poisson	-	0,2	0,3	0,3
Cường độ chịu nén	MPa	23,6	-	-
Cường độ chịu kéo	MPa	3,01	-	-
Giới hạn chảy	MPa	-	420	1.460
Giới hạn bền	MPa	-	620	1.725



Hình 2: Chi tiết dầm BTCT UST

mô phỏng theo tài liệu². Trong đó, ảnh hưởng của lực UST đến tần số dao động được xem xét thông qua giá trị mô đun đàn hồi tương đương. Kết hợp với các dữ liệu từ thực nghiệm, mô đun đàn hồi tương đương của dầm BTCT UST được xác định như sau⁸:

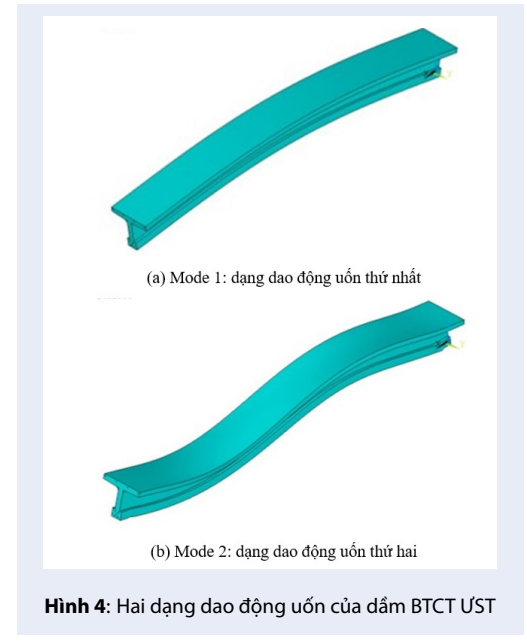
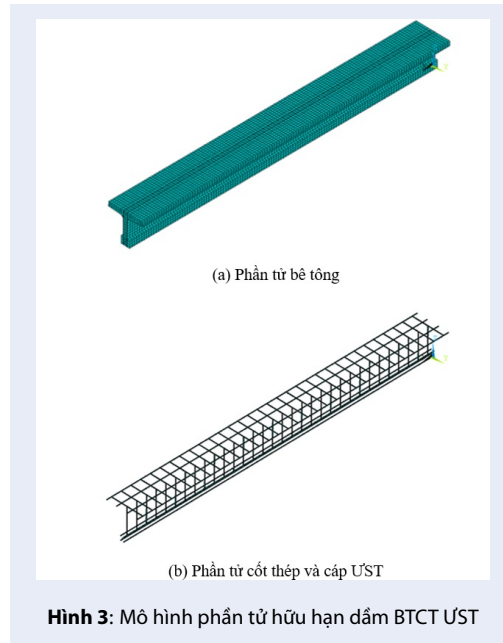
$$E_{eq} = (1 + 7,89 \times 10^{-4} N) E_c \quad (10)$$

trong đó, E_{eq} là mô đun đàn hồi tương đương (MPa); N là lực UST trong dầm (kN); E_c là mô đun đàn hồi của bê tông (MPa).

Kết quả phân tích tần số dao động được thực hiện. Nghiên cứu này chọn hai dạng dao động (mode) uốn đầu tiên để khảo sát. Hình dạng dao động được thể hiện tại Hình 4. Ngoài ra, độ tin cậy của mô hình

PTHH được kiểm chứng với tần số thực nghiệm³, chi tiết được trình bày tại Bảng 3. Trong thực nghiệm, dầm BTCT UST này được tiến hành thí nghiệm trong phòng với sự kiểm soát chặt chẽ về độ ẩm và nhiệt độ; các yếu tố này được giữ gần như không đổi định trong suốt thí nghiệm (nhiệt độ chỉ dao động trong biên độ rất nhỏ từ 20,4°C đến 21,5°C)³. Do vậy, các yếu tố môi trường xem như không gây ra ảnh hưởng đến tần số dao động của dầm BTCT UST.

Kết quả mô phỏng cho thấy giá trị tần số dao động của dầm tăng khi lực UST trong dầm tăng. Quan hệ này hoàn toàn phù hợp với kết quả ghi nhận từ thực nghiệm³ và các nghiên cứu khác^{9,10}. Sai lệch về tần số dao động giữa mô phỏng và thực nghiệm nhỏ hơn



5%; mức độ chênh lệch về tần số dao động giữa các cấp lực UST là tương đương nhau. Sự khác biệt giữa mô phỏng và thực nghiệm là do các nguyên nhân như sau: mô hình PTHH chỉ diễn tả được gần đúng ứng xử thực tế của dầm; sai số trong quá trình thực nghiệm, ... Việc sử dụng tần số dao động để dự đoán lực UST trong dầm BTCT UST không phụ thuộc quá nhiều vào mức độ chính xác của kết quả phân tích tần số dao động mà phụ thuộc chủ yếu vào xu hướng và mức độ biến động giá trị tần số giữa các cấp lực UST. Do vậy, kết quả mô phỏng đủ tin cậy để sử dụng cho việc dự đoán lực UST của dầm BTCT UST. Kết quả phân tích tần số dao động của dầm ứng với các cấp lực UST khác nhau được liệt kê trong Bảng 4. Ngoài các trường hợp theo khảo sát của³ (PS0, PS1, PS2, PS3, PS4, PS5), nghiên cứu này thực hiện khảo sát mở rộng thêm các trường hợp PS6, PS7, PS8, PS9.

Dự đoán lực ứng suất trước sử dụng mô hình học máy

Tập dữ liệu tần số dao động ứng với 10 cấp lực UST (Bảng 4) được sử dụng để thiết lập mô hình học máy cho việc dự đoán lực UST trong dầm. Với tập dữ liệu có số lượng dữ liệu không nhiều như trên, phương pháp kiểm thử chéo Leave One Out Cross-Validation (LOOCV) được thực thi để đánh giá tính đầy đủ và độ chính xác của mô hình học máy; cụ thể, tập dữ liệu sẽ được chia thành 2 tập con là tập huấn luyện và kiểm thử (tập CV gồm các trường hợp từ PS0 đến PS5) và tập kiểm tra (tập Test gồm các trường hợp từ PS6 đến

PS9). Chi tiết các tập dữ liệu (huấn luyện và kiểm thử) được liệt kê tại Bảng 5.

Kết quả huấn luyện và kiểm thử của từng tập CV con được trình bày chi tiết tại Bảng 6. Kết quả dự đoán lực UST trên tập kiểm thử có độ chính xác cao, sai lệch lớn nhất chỉ 0,23%. Các mô hình cho hiệu quả dự đoán cao với chỉ số RMSE trung bình lớn nhất chỉ là 0,14 kN cho mode 1 và 0,06 kN cho mode 2. Kết quả trên cho thấy mô hình dự đoán hoạt động rất hiệu quả trên tập kiểm thử. Ngoài ra, quá trình đánh giá trên tập kiểm thử cho thấy khi sử dụng kết hợp tần số của 2 mode không giúp cải thiện mức độ chính xác của kết quả dự đoán so với khi sử dụng riêng lẻ tần số dao động của từng mode. Tiếp đó, tất cả dữ liệu trong tập CV được sử dụng để tạo ra mô hình hoàn chỉnh dùng cho việc dự đoán lực UST cho dầm. Hiệu quả dự đoán của mô hình học máy đề xuất này được tính bằng trung bình cộng chỉ số RMSE của 6 tập CV. Mô hình đề xuất được thể hiện qua biểu đồ quan hệ lực UST và tần số dao động tại Hình 5.

Mô hình học máy hồi quy đa thức hoàn chỉnh được thực thi để dự đoán lực UST cho tập dữ liệu kiểm tra (tập Test), chi tiết kết quả được trình bày tại Bảng 7. Đối với trường hợp sử dụng kết hợp dữ liệu tần số dao động của cả 2 mode, độ chính xác của kết quả dự đoán cho thấy không có sự cải thiện rõ rệt so với khi sử dụng riêng lẻ từng mode. Trường hợp sử dụng giá trị tần số trung bình cho kết quả dự đoán có sai lệch nhỏ nhất khi đánh giá trên tập dữ liệu kiểm tra. Như vậy, mô hình đề xuất có khả năng dự đoán lực UST với độ chính xác cao, sai lệch lớn nhất nhỏ hơn 1%.

Bảng 3: So sánh tần số dao động (Hz)

Trường hợp	Lực (kN)	UST	Mode 1			Mode 2		
			Thực nghiệm	Mô phỏng	Sai lệch (%)	Thực nghiệm	Mô phỏng	Sai lệch (%)
PS0	0,0		22,730	23,863	4,99	98,420	100,794	2,41
PS1	39,2		23,080	24,194	4,83	98,730	102,249	3,56
PS2	58,8		23,230	24,357	4,85	101,390	102,967	1,56
PS3	78,4		23,390	24,519	4,83	101,650	103,680	2,00
PS4	98,0		23,600	24,680	4,58	101,700	104,389	2,64
PS5	117,6		23,720	24,841	4,73	102,540	105,094	2,49

Bảng 4: Kết quả tần số dao động khi lực UST thay đổi

Trường hợp	Lực UST (kN)	Tần số dao động (Hz)	
		Mode 1	Mode 2
PS0	0,0	23,863	100,794
PS1	39,2	24,194	102,249
PS2	58,8	24,357	102,967
PS3	78,4	24,519	103,680
PS4	98,0	24,680	104,389
PS5	117,6	24,841	105,094
PS6	10,0	23,948	101,167
PS7	50,0	24,284	102,644
PS8	100,0	24,697	104,462
PS9	130,0	24,941	105,536

Bảng 5: Chi tiết tập dữ liệu huấn luyện và tập dữ liệu kiểm thử (tập CV)

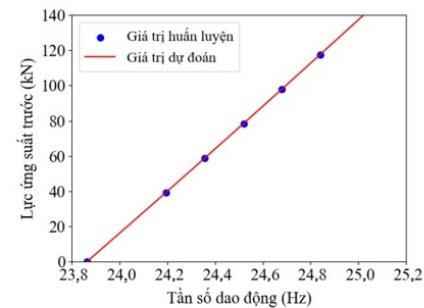
Lần lặp	Lực kiểm thử (kN)	UST	Fold 1 (PS0)	Fold 2 (PS1)	Fold 3 (PS2)	Fold 4 (PS3)	Fold 5 (PS4)	Fold 6 (PS5)
1	0,00		KT	HL	HL	HL	HL	HL
2	39,20		HL	KT	HL	HL	HL	HL
3	58,80		HL	HL	KT	HL	HL	HL
4	78,40		HL	HL	HL	KT	HL	HL
5	98,00		HL	HL	HL	HL	KT	HL
6	117,60		HL	HL	HL	HL	HL	KT
Mô hình hoàn chỉnh			HL	HL	HL	HL	HL	HL

Bảng 6: Chi tiết kết quả đánh giá trên tập CV

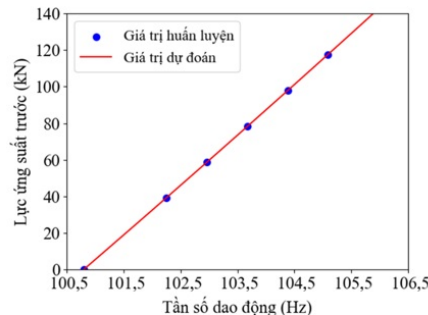
Trường hợp kiểm thử		Sử dụng tần số mode 1				Sử dụng tần số mode 2			
		Lực UST thực tế (kN)	Lực UST dự đoán (kN)	Sai lệch (%)	RMSE (kN)	Lực UST dự đoán (kN)	Sai lệch (%)	RMSE (kN)	
Fold 1 (PS0)		0,00	-0,40	-	0,40	-0,17	-	0,17	
Fold 2 (PS1)		39,20	39,29	0,23	0,09	39,24	0,11	0,04	
Fold 3 (PS2)		58,80	58,81	0,02	0,01	58,80	0,01	0,00	
Fold 4 (PS3)		78,40	78,36	0,06	0,04	78,37	0,04	0,03	
Fold 5 (PS4)		98,00	97,92	0,08	0,08	97,98	0,02	0,02	
Fold 6 (PS5)		117,60	117,80	0,17	0,20	117,67	0,06	0,07	
			Trung bình		0,14	Trung bình		0,06	
Trường hợp kiểm thử		Lực UST thực tế (kN)	Sử dụng tần số trung bình			Sử dụng kết hợp 2 mode			
			Lực UST dự đoán (kN)	Sai lệch (%)	RMSE (kN)	Lực UST dự đoán (kN)	Sai lệch (%)	RMSE (kN)	
Fold 1 (PS0)		0,00	-0,21	-	0,21	-0,30	-	0,30	
Fold 2 (PS1)		39,20	39,25	0,13	0,05	39,05	0,38	0,15	
Fold 3 (PS2)		58,80	58,80	0,01	0,00	58,82	0,03	0,02	
Fold 4 (PS3)		78,40	78,37	0,04	0,03	78,38	0,02	0,02	
Fold 5 (PS4)		98,00	97,97	0,03	0,03	98,05	0,05	0,05	
Fold 6 (PS5)		117,60	117,69	0,08	0,09	117,99	0,33	0,39	
			Trung bình		0,07	Trung bình		0,21	

Bảng 7: Kết quả dự đoán lực UST bằng mô hình học máy

Trường hợp		Lực UST (kN)	Sử dụng tần số mode 1		Sử dụng tần số mode 2	
			Lực UST dự đoán (kN)	Sai lệch (%)	Lực UST dự đoán (%)	Sai lệch (%)
PS6		10,00	10,01	0,12	9,99	0,06
PS7		50,00	50,04	0,07	49,98	0,04
PS8		100,00	100,02	0,02	100,01	0,01
PS9		130,00	129,95	0,04	129,99	0,01
Trường hợp		Lực UST (kN)	Sử dụng tần số trung bình		Sử dụng kết hợp 2 mode	
			Lực UST dự đoán (kN)	Sai lệch (%)	Lực UST dự đoán (%)	Sai lệch (%)
PS6		10,00	10,00	0,03	9,91	0,93
PS7		50,00	50,00	0,01	50,03	0,05
PS8		100,00	100,00	0,00	100,02	0,02
PS9		130,00	129,98		130,40	0,30



(a) Mode 1



(b) Mode 2

Hình 5: Đường xấp xỉ thể hiện quan hệ giữa lực UST và tần số dao động

KẾT LUẬN

Trong bài báo này, một mô hình học máy hồi quy đa thức, có khả năng dự đoán chính xác lực UST trong dầm BTCT UST từ tần số dao động của dầm đã được phát triển thành công. Mô hình PTHH của dầm BTCT UST có độ tin cậy cao khi so sánh với kết quả thực nghiệm. Từ đó, mô hình học máy được đề xuất sử dụng thuật toán hồi quy đa thức đơn giản nhưng cho hiệu quả cao trong việc dự đoán lực UST. Giá trị lực UST được dự đoán từ tần số dao động của dầm có độ chính xác rất cao; sai lệch thấp hơn 1%. Mô hình đề xuất này cho kết quả dự đoán chính xác trên cả tập kiểm thử (tập CV) và tập kiểm tra (tập Test). Kết quả đánh giá trên cả tập kiểm thử và tập kiểm tra cho thấy, so với khi dùng từng mode riêng lẻ, việc dùng kết hợp tần số của cả 2 mode cải thiện không nhiều độ chính xác của kết quả dự đoán.

LỜI CẢM ƠN

Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ cho nghiên cứu này. Trần

Mạnh Hùng được tài trợ bởi Chương trình học bổng đào tạo thạc sĩ, tiến sĩ trong nước của Quỹ Đổi mới sáng tạo Vingroup (VINIF), mã số VINIF.2024.TS.099.

XUNG ĐỘT LỢI ÍCH

Nhóm tác giả xin cam đoan rằng không có bất kỳ xung đột lợi ích nào trong công bố bài báo.

ĐÓNG GÓP CỦA CÁC TÁC GIẢ

Trần Mạnh Hùng, Trần Quốc Tiến, Nguyễn Trần Minh Quân, Bùi Ngọc Tuấn Hùng, Lê Hoàng Khánh, Chiêm Hồng Huân, Nguyễn Chí Khải, Vũ Khánh Hoàng đã thực hiện mô hình và lập trình tính toán, phân tích kết quả và viết bản thảo bài báo. Hà Minh Tuấn, Hồ Đức Duy đã đưa ra ý tưởng nghiên cứu, chỉnh sửa và hoàn thiện bản thảo bài báo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Chen HP. Structural health monitoring of large civil engineering structures. John Wiley & Sons Ltd; 2018;.
- Kim JT, Yun CB, Ryu YS, Cho HM. Identification of prestress-loss in PSC beams using modal information. Structural Engineering and Mechanics. 2004;17(3-4):467-482; Available from: https://doi.org/10.12989/sem.2004.17.3_4.467.
- Kim JT, Park JH, Hong DS, Park WS. Hybrid health monitoring of prestressed concrete girder bridges by sequential vibration-impedance approaches. Engineering Structures. 2010;32(1):115-128; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.08.021>.
- Ho DD, Kim JT, Stubbs N, Park WS. Prestress-force estimation in PSC girder using modal parameters and system identification. Advances in Structural Engineering. 2012;15(6):997-1012; Available from: <https://doi.org/10.1260/1369-4332.15.6.997>.
- Abdel-Jaber H, Glisic B. Monitoring of prestressing forces in prestressed concrete structures—An overview. Structural Control and Health Monitoring. 2019;26(8):e2374; Available from: <https://doi.org/10.1002/stc.2374>.
- Naser MZ. Machine learning for civil & environmental engineers. Wiley, New Jersey; 2023;.
- Vũ HT. Machine learning cơ bản. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội; 2018;.
- Nguyễn MTA. Chẩn đoán hư hỏng dầm bê tông cốt thép ứng suất trước căng sau sử dụng mô hình hỗn hợp dao động-trở kháng [Master's thesis]. Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM; 2015;.
- Bonopera M, Chang KC, Lee ZK. State-of-the-art review on determining prestress losses in prestressed concrete girders. Applied Sciences (Switzerland). 2020;10(20):1-14; Available from: <https://doi.org/10.3390/app10207257>.
- Gan BZ. The influence of prestressing force on natural frequencies of beams [PhD dissertation]. Nanyang Technological University, Singapore; 2019;.

Prediction of prestress-force in prestressed concrete beams using natural frequency and machine learning

Manh-Hung Tran^{1,2}, Quoc-Tien Tran^{1,2}, Tran-Minh-Quan Nguyen^{1,2}, Ngoc-Tuan-Hung Bui^{1,2},
Hoang-Khanh Le^{1,2}, Hong-Huan Chiem^{1,2}, Chi-Khai Nguyen^{1,2}, Khanh-Hoang Vu^{1,2}, Tuan Minh Ha³,
Duc-Duy Ho^{1,2,*}

ABSTRACT

Civil infrastructure plays an important role in our life and the development of our country. However, it is affected by many different factors during the operation and degraded after a long time of use. In order to ensure safe operation, the field of structural health monitoring (SHM) has been developed. In recent years, the explosion of artificial intelligence (AI) has contributed to all aspects of social life including the field of SHM. In the civil engineering field, prestressed concrete structures have been widely applied to many projects (i.e., bridges, tall buildings, ...). The common damages on prestressed concrete structures lead to the loss of prestress-force. This paper proposes a method to predict the prestress-force in prestressed concrete beams using natural frequency and machine learning. First, the natural frequencies of a prestressed concrete beam are achieved by a finite element model. The finite element model's reliability is verified by the experimental results. Then, a machine learning model named polynomial regression algorithm is developed to predict the prestress-force in the beam using natural frequency. The proposed method is highly accurate in predicting the prestress-force for prestressed concrete beams. In addition, this study also examines and assesses the effect of combining natural frequencies of multi-mode to predict the prestress-force.

Key words: prestress-force, prestressed concrete beam, natural frequency, machine learning, polynomial regression algorithm

¹Faculty of Civil Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT), Ho Chi Minh City, Vietnam

²Vietnam National University Ho Chi Minh City, Thu Duc City, Ho Chi Minh City, Vietnam

³Vietnam-Japan Institute of Technology, HUTECH University, Ho Chi Minh City, Vietnam

Correspondence

Duc-Duy Ho, Faculty of Civil Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT), Ho Chi Minh City, Vietnam

Vietnam National University Ho Chi Minh City, Thu Duc City, Ho Chi Minh City, Vietnam

Email: hoducduy@hcmut.edu.vn

History

- Received: 05-6-2024
- Revised: 08-8-2024
- Accepted: 18-11-2024
- Published Online: 31-12-2024

DOI :<https://doi.org/10.32508/stdjet.v7i4.1380>



Cite this article : Tran M, Tran Q, Nguyen T, Bui N, Le H, Chiem H, Nguyen C, Vu K, Ha T M, Ho D. **Prediction of prestress-force in prestressed concrete beams using natural frequency and machine learning.** *Sci. Tech. Dev. J. – Engineering and Technology* 2024, 7(4):2392-2401.